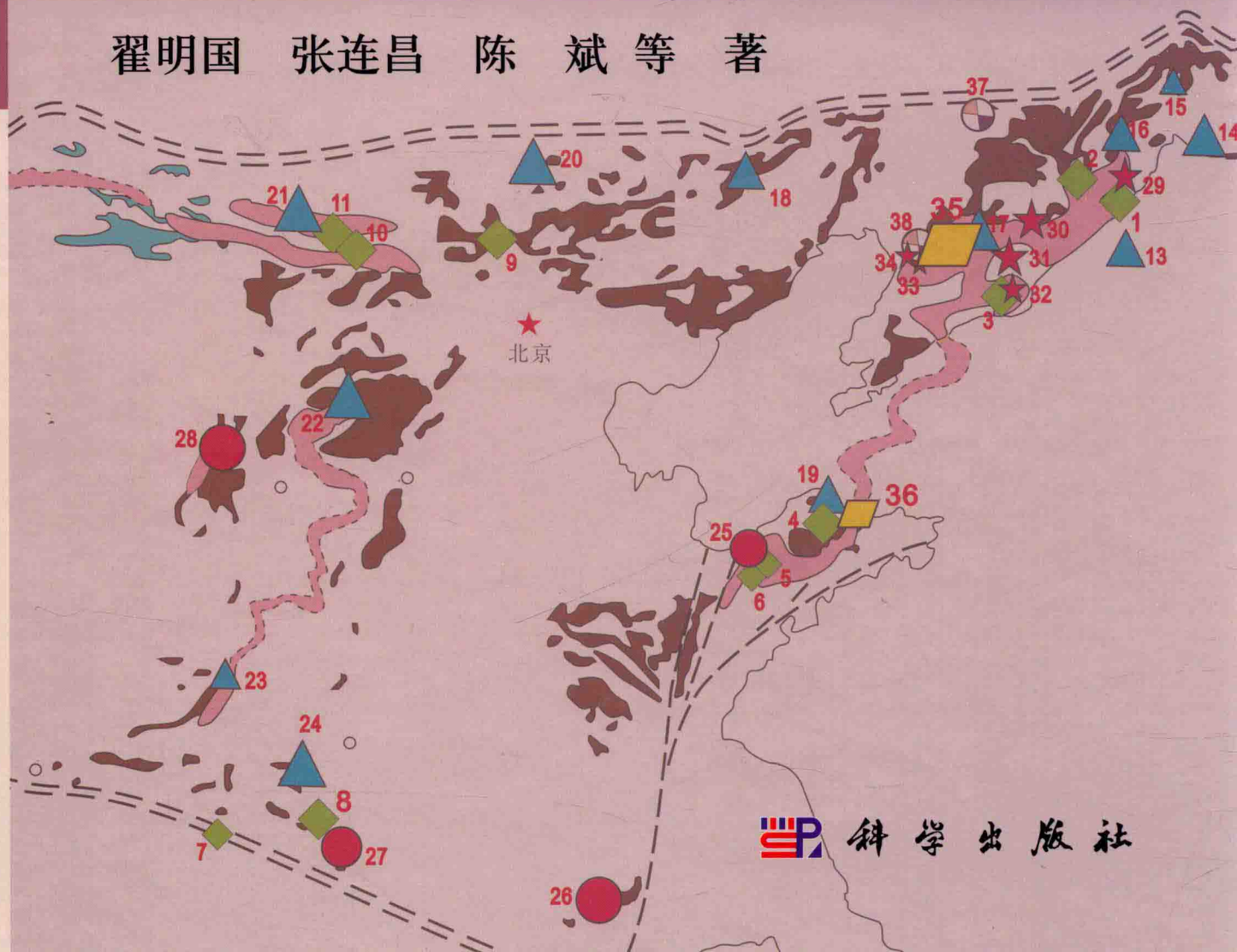




华北克拉通前寒武纪 重大地质事件与成矿

翟明国 张连昌 陈 斌 等 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

华北克拉通前寒武纪 重大地质事件与成矿

翟明国 张连昌 陈 斌 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书集中反映国家重点基础研究发展计划项目“华北克拉通前寒武纪重大地质事件与成矿”的成果,紧紧围绕“华北克拉通前寒武纪陆壳巨量生长、构造体制转变和环境突变过程中成矿元素巨量聚集的机理和规律”这一主题展开论述。该项目首次在奥陶纪火山岩中发现大于4.0 Ga的锆石,揭示华北克拉通初始地壳可能在冥古宙早期已形成;提出太古宙地壳于2.8~2.7 Ga大量生长,2.5 Ga微陆块拼合,建立了华北克拉通的陆壳演化格架,提出华北新太古代大陆巨量增生机制与条带状铁矿的形成机制;揭示古元古代大氧化事件的形成机制与事件序列以及华北克拉通古元古代表生矿产的形成规律;提出古元古代极端变质作用的机制以及早期板块构造体制启动的理论模式;建立了中-新元古代“地球中年期”的概念,厘定了华北克拉通中-新元古代的地幔隆升与大火成岩省事件。在成矿理论方面,提出矿产资源与大陆地壳同步演化以及不可重复的理论框架;建立了华北克拉通重大地质-成矿事件序列,提出前寒武纪四大成矿体系,同时瞄准国家目标,开展优势矿产控矿因素和成矿预测工作。

本书可为前寒武纪地质、矿床地质与矿产勘查等地质专业的科技工作者及学生提供参考,也可供跨学科、跨专业的科技工作者阅读和了解。

审图号:GS(2018)2549号

图书在版编目(CIP)数据

华北克拉通前寒武纪重大地质事件与成矿 / 翟明国等著. —北京:科学出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-03-059378-8

I. ①华… II. ①翟… III. ①前寒武纪地质-华北地区 IV. ①P534.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第251619号

责任编辑:王 运 韩 鹏 陈姣姣 / 责任校对:王 瑞

责任印制:肖 兴 / 封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第 一 版 开本:889×1194 1/16

2018年11月第一次印刷 印张:34 1/2

字数:1 050 000

定价:468.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

前寒武纪占地质历史的 85% 以上，形成了大陆地壳的主体，蕴藏着丰富的矿产资源，一些重要矿产，如铁、金、铜、铅、锌、铀等的资源量远大于其他地质时代。这些矿产的成因类型独特，与重大地质事件密切相关，具有鲜明的时控性，许多矿产类型仅限于特定地质时代，此后不再出现或极为罕见。前寒武纪最重要的三大地质事件包括陆壳的巨量增生、前板块机制/板块机制的构造转折，以及由缺氧到富氧的地球环境的剧变。研究前寒武纪成矿作用，无论对认知地球早期演化，还是发展成矿理论都具有重大意义。

华北克拉通是全球最古老陆块之一，记录了前寒武纪各阶段全球性重大地质事件，并表现出一些特殊性。与全球其他克拉通相比，华北陆壳生长-稳定化过程具有多阶段特征，太古宙末-古元古代环境剧变记录复杂多样，古元古代与板块体制建立和超大陆演化相关的俯冲碰撞和伸展裂解等地质记录丰富，中-新元古代经历持续伸展并接受巨量裂谷沉积。这些重大地质事件都伴随大规模成矿作用，形成了华北克拉通丰富的矿产资源和独特的优势矿种。

本书是国家重点基础研究发展计划项目“华北克拉通前寒武纪重大地质事件与成矿”的成果。项目紧紧围绕“华北克拉通前寒武纪陆壳巨量生长、构造体制转变和环境突变过程中成矿元素巨量聚集的机理和规律”这一关键科学问题，以早期陆壳的形成—生长—稳定—再造及成矿过程中的重大地质事件为切入点，以华北特色矿产与关键事件的联系为突破口开展工作，在前寒武纪陆壳演化与成矿理论方面取得一系列研究成果。首次在奥陶纪火山岩中发现大于 4.0 Ga 的锆石，揭示华北克拉通初始地壳可能在冥古宙早期已经形成；提出太古宙地壳于 2.8~2.7 Ga 大量生长，2.5 Ga 微陆块拼合，建立了华北克拉通的陆壳演化格架，提出华北新太古代大陆巨量增生机制与条带状铁矿的形成机制；揭示了古元古代大氧化事件的形成机制与事件序列以及华北克拉通古元古代表生矿产的形成规律；提出古元古代极端变质作用的机制以及早期板块构造体制启动的理论模式；建立了中-新元古代“地球中年期”的概念，厘定了华北克拉通中-新元古代的地幔隆升与大火成岩省事件。在成矿理论方面，提出矿产资源与大陆地壳同步演化以及不可重复的理论框架；建立了华北克拉通重大地质-成矿事件序列，提出前寒武纪四大成矿体系，即与陆壳生长和地壳分异有关的 BIF 成矿体系，与地球环境突变有关的铁、镁、硼和石墨成矿体系，与早期板块构造（裂谷-俯冲-碰撞）有关的铜、（钛）铁、铅锌成矿体系，与地球“中年期”多期裂谷岩浆-沉积有关的铁铅锌钼、铌铁、稀土成矿体系；解读华北克拉通前寒武纪成矿“暴贫暴富”的原因，并开展全球对比研究。同时瞄准国家目标，开展优势矿产控矿因素和成矿预测工作，为华北前寒武纪找矿突破提供依据和靶区。

本书集中反映国家重点基础研究发展计划项目“华北克拉通前寒武纪重大地质事件与成矿”的研究成果。全书共 6 篇 14 章。

第一篇概述大陆地壳的演化历史，以及国家重点基础研究发展计划项目“华北克拉通前寒武纪重大地质事件与成矿”的主要研究成果，本篇共 2 章，由翟明国负责完成。

第二篇以华北克拉通早期陆壳生长与条带状铁矿为主要内容，重点研究冥古宙地壳物质的发现、古太古代早期陆核的形成、新太古代陆壳巨量生长和早期陆壳多阶段生长模式与克拉通化，太古宙绿岩带与条带状铁矿分布特征、BIF 铁矿形成时代与物质来源、BIF 铁矿的形成环境与形成机制和 BIF 铁矿与陆壳生长的关系及控制因素等。本篇共 2 章，分别由张连昌和万渝生协调统稿。

第三篇以古元古代大氧化事件与成矿响应为主要内容，重点介绍大氧化事件序列重建、华北大氧化事件的确定、表生环境巨量元素富集、菱镁矿“暴富”成矿、苏必利尔型 BIF 铁矿的特点等。本篇共 2 章，分别由陈衍景和杨晓勇协调统稿。

第四篇以古元古代活动带和构造体制转折及成矿作用为主要内容，重点介绍胶辽、丰镇、晋豫陕等古元古代活动带特征和构造体制转折机制，以及古元古代活动带岩浆活动年代框架和构造背景，介绍古元古代高压基性麻粒岩、高温-高压泥质麻粒岩、高温-高压变质作用相关的岩浆活动，以及高级变质作用与早期板块构造，以铜矿峪为例的内生成矿作用，和后仙峪硼矿为例的表生成矿作用。本篇共3章，分别由陈斌、郭敬辉和牛贺才协调统稿。

第五篇以中-新元古代多期裂解事件与特色成矿为主要内容，重点介绍华北中-新元古代地层与盆地、中-新元古代四期裂谷-岩浆活动事件、地球“中年期”的新概念及其意义，中元古代大规模幔源岩浆活动与稀土成矿事件，燕辽地区基性大火成岩省地质特征、白云鄂博稀土矿地质特征，新元古代辉绿岩床（墙）群的确定及新元古代裂谷事件，以狼山成矿带为例介绍喷流-沉积铜铅锌矿床的研究成果。本篇共3章，分别由赵太平、张拴宏和彭澎协调统稿。

第六篇以华北克拉通前寒武纪重大地质事件及成矿系统为主要内容，重点介绍四期前寒武纪重大地质事件与成矿规律，以铁、铜成矿演化规律为例，介绍华北前寒武纪优势矿产远景评价、优势矿产地球物理探查示范等内容。本篇共2章，分别由范宏瑞和薛国强协调统稿。

全书最后由翟明国、张连昌、陈斌统编定稿，周艳艳做了大量协助工作。同时，在组稿、编辑及校对过程中，周艳艳、胡波、焦淑娟、佟小雪、彭自栋等做了大量辅助工作。

目 录

前言

第一篇 概论——大陆演化与成矿演化

第一章 关于大陆演化与成矿	翟明国 / 3
第一节 前寒武纪重大地质事件及其在大陆演化与成矿中的重大意义	3
第二节 华北的陆壳演化与重大地质事件	6
第三节 华北前寒武纪成矿	7
参考文献	8
第二章 华北克拉通前寒武纪研究重要进展	翟明国 / 11
第一节 华北克拉通早期陆壳生长与条带状铁矿	11
第二节 大氧化事件与成矿元素迁移富集	13
第三节 古元古代活动带与构造体制转折及其成矿作用	15
第四节 中-新元古代多期裂解事件性质及其成矿专属性	18
第五节 前寒武纪成矿体系与大陆成矿演化	21
参考文献	25

第二篇 华北克拉通早期陆壳生长与条带状铁矿

第三章 华北克拉通早期陆壳多期生长	33
第一节 冥古宙地壳物质的发现	第五春荣、孙勇 / 33
第二节 太古宙早期陆核	万渝生 / 39
第三节 新太古代陆壳巨量生长	万渝生 / 47
第四节 早期陆壳多阶段生长模式与克拉通化	张成立 / 55
参考文献	73
第四章 华北克拉通太古宙条带状铁矿	91
第一节 太古宙绿岩带与条带状铁矿分布特征	彭澎、张连昌 / 91
第二节 BIF 铁矿形成时代与物质来源	王长乐、张连昌、佟小雪 / 105
第三节 BIF 铁矿的形成环境与形成机制	张连昌、王长乐、彭自栋 / 112
第四节 BIF 铁矿与陆壳生长的关系及控制因素	张连昌、万渝生 / 120
参考文献	131

第三篇 古元古代大氧化事件与成矿响应

第五章 全球大氧化事件序列重建	145
第一节 大氧化事件序列重建	汤好书、陈衍景 / 145
第二节 华北大氧化事件的确定	陈衍景、汤好书 / 155

参考文献·····	170
第六章 巨量元素富集与特色成矿 ·····	180
第一节 表生环境巨量元素富集·····	汤好书、陈衍景 / 180
第二节 菱镁矿“暴富”成矿·····	陈衍景、汤好书 / 188
第三节 舞阳古元古代 BIF 铁矿成因·····	兰彩云、赵太平 / 203
第四节 霍邱杂岩地球化学及 BIF 成矿作用·····	杨晓勇、刘磊 / 213
参考文献·····	226

第四篇 古元古代活动带和构造体制转折及成矿作用

第七章 古元古代活动带和构造体制转折 ·····	241
第一节 胶辽活动带·····	陈斌、李壮 / 241
第二节 丰镇活动带·····	张华锋 / 255
第三节 晋豫活动带·····	姜玉航、周艳艳、牛贺才 / 260
第四节 古元古代活动带岩浆活动年代框架和构造背景·····	张晓晖 / 271
参考文献·····	280
第八章 古元古代高级变质作用与早期板块构造 ·····	郭敬辉、刘福来、彭澎 / 296
第一节 高压基性麻粒岩的发现与华北克拉通古元古代碰撞构造研究回顾·····	296
第二节 高压麻粒岩主要特点、分布与古元古代构造带·····	298
第三节 超高温 (UHT) 麻粒岩与孔兹岩带·····	302
参考文献·····	306
第九章 古元古代活动带成矿作用 ·····	312
第一节 铜矿峪矿床流体成矿作用·····	赵严、姜玉航、牛贺才 / 312
第二节 表生成矿作用：后仙峪硼矿·····	王志强、鄢雪龙、陈斌 / 323
参考文献·····	336

第五篇 中-新元古代多期裂解事件与特色成矿

第十章 地球“中年期”和华北四期岩浆事件 ·····	345
第一节 地球中年期的新概念及其意义·····	赵太平、翟明国 / 345
第二节 华北中-新元古代地层与盆地·····	赵太平、胡波 / 347
第三节 华北中-新元古代四期裂谷-岩浆活动事件·····	彭澎、赵太平 / 356
第四节 本章小结·····	367
参考文献·····	368
第十一章 中元古代中期大规模幔源岩浆活动与稀土成矿事件 ·····	379
第一节 燕辽地区基性大火成岩省地质特征·····	张拴宏、赵越 / 379
第二节 燕辽基性大火成岩省全球对比及其对超大陆重建的意义·····	张拴宏、赵越 / 419
第三节 白云鄂博稀土矿床成因·····	杨奎锋、范宏瑞 / 423
参考文献·····	432
第十二章 新元古代岩浆-裂谷事件与成矿 ·····	439
第一节 新元古代岩浆活动·····	彭澎、张拴宏 / 439
第二节 新元古代裂谷-沉积记录·····	胡健民 / 447

第三节 喷流-沉积铜铅锌矿床	彭润民 / 464
参考文献	472

第六篇 华北克拉通前寒武纪重大地质事件及成矿系统

第十三章 地球演化与成矿演化规律	481
第一节 前寒武纪重大地质事件与成矿规律	翟明国、赵太平、张连昌 / 481
第二节 铁、铜成矿演化规律	范宏瑞、杨奎锋 / 493
参考文献	499
第十四章 华北克拉通前寒武纪优势矿产资源评价与预测	505
第一节 华北前寒武纪优势矿产远景评价	陈建平 / 505
第二节 优势矿产瞬变电磁探查示范	薛国强 / 523
第三节 BIF 型铁矿磁法探查示范	于昌明 / 532
参考文献	543



第一篇 概论——大陆演化 与成矿演化



第一章 关于大陆演化与成矿

地球是一个演化的行星，它像万物一样具有生命，经历着由混沌到成熟、由无序到有序、由年轻到老年的过程，并不可避免地最后死亡，不以人们的意志为转移。它的演化是通过重大地质事件来实现的，集中表现为古太古代大陆地壳的巨量生长和稳定化、太古宙末—古元古代代表生环境的突变和大氧化事件、古元古代全球性板块体制建立、显生宙的造山运动和洋陆转换。前寒武纪的重大地质事件是尤为重要的，它们记录了地球 90% 以上的演化历史。这些重大地质事件的物质载体是大陆，80% 以上的陆壳是前寒武纪生成的，其余的约 20% 的陆壳是在显生宙期间洋陆和壳幔相互作用的产物，其中古老陆壳循环改造的贡献还没有被完全研究清楚。最早的大陆物质的年龄约 4.5 Ga，和地球的年龄几乎相当。有经济价值的岩石，就是固体矿产资源，前寒武纪地质时期造就了全球矿产的绝大部分。因此，前寒武纪重大地质事件及成矿作用，无疑是研究大陆演化以及成矿作用的关键性、前沿性和基础性的学科。

第一节 前寒武纪重大地质事件及其在大陆演化与成矿中的重大意义

人们推测地球在形成后的最初 800 ~ 600 Ma，曾有一个地壳的演化阶段叫做冥古宙（Hadean）或创成期（Informal），认为地球表面是深达数十千米（Hofmeister, 1983）或数百千米（Solmon, 1980）的岩浆海，其物质成分相当于地幔与地壳的成分总和，称为硅酸盐海。岩浆海的分异形成地幔和地壳，是一个可能的过程。月球的研究似乎表明这个分异过程可以形成斜长岩地壳和月幔（Binder, 1998; Hawke et al., 2003），而月海玄武岩是在之后的陨石撞击导致的月幔熔融形成的。但是在地球上没有发现冥古宙或始太古代甚至古太古代的斜长岩。地球上最古老的陆壳物质是采自西澳大利亚 Yilgarn 地盾 Jack Hills 沉积砾岩的碎屑锆石，它的 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素年龄是 4.404 Ga（Wilde et al., 2001; Izuka et al., 2006; Nemchin et al., 2006; Harrison, 2009）。同位素特征表明锆石来自英云闪长质的岩石中，说明在约 4.4 Ga 之前，地球上已经存在陆壳物质——花岗岩组分的岩石。此外，地质学家还在加拿大克拉通上发现有年龄为 4.065 ~ 4.025 Ga 的英云闪长质岩石（Acasta gneiss），这是目前最古老的岩石（Bowring and Williams, 1999）。地球上约 3.8 Ga 的奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩质（TTG）岩石有较多的出露，并且分布在不同的大陆上形成陆核。陆核是如何形成的，至今仍是疑案。此后，在太古宙和元古宙漫长的演化中，地球上发生了许多惊心动魄的故事，特别是巨量陆壳的形成、构造体制（从前板块构造到板块构造）的转变，以及地球环境（从缺氧到富氧）的剧变三大地质事件（图 1.1）。

早期地壳的形成是以大量 TTG 岩石为代表的。3.8 Ga 的陆壳在数量上虽然保留有限，但分布广泛，几乎已经在世界上所有的克拉通都有报道。在西格陵兰还见到有 3.8 Ga 的含条带状铁建造的表壳岩石，表明那时已经有相当规模的沉积岩。3.3 Ga 也是早期陆壳重要的生长期，在不少克拉通都有新生陆壳生长和活化的记录（Zhai, 2014）。中太古代晚期—新太古代是大陆地壳形成的主要时期，其高峰值约在 2.7 Ga。以 TTG 岩石为代表的陆壳是如何形成的，是一个有争议和具有挑战性的课题。实验岩石学证明硅酸盐岩浆还分异不出巨量的 TTG 陆壳。目前一些学者试图用先有基性岩地壳，再发生部分熔融来解释 TTG 的成因。由于没有确切的先存洋壳的证据，所以将基性岩地壳叫做初始地壳（juvenile crust），其熔融机制或认为与地幔柱有关，或认为与俯冲或加厚的基性地壳部分熔融有关。到 2.5 Ga 左右，全球的大陆壳已经有与显生宙相当的规模，形成了超级克拉通（Rogers and Santosh, 2003）。因此，在地球的演化历史上，全球的克拉通化无疑具有无与伦比的意义，至少形成了壳-幔-核的结构和与现今较为相似的洋陆格局以及岩石圈和软流圈耦合的层圈构造。现代大陆由两个最基本的岩石构造单元组成，即克拉通与造山带。克拉通至少占了陆壳的 80%，而造山带中还有相当一部分古老克拉通被消耗并被新生的地壳取代（图 1.2）。

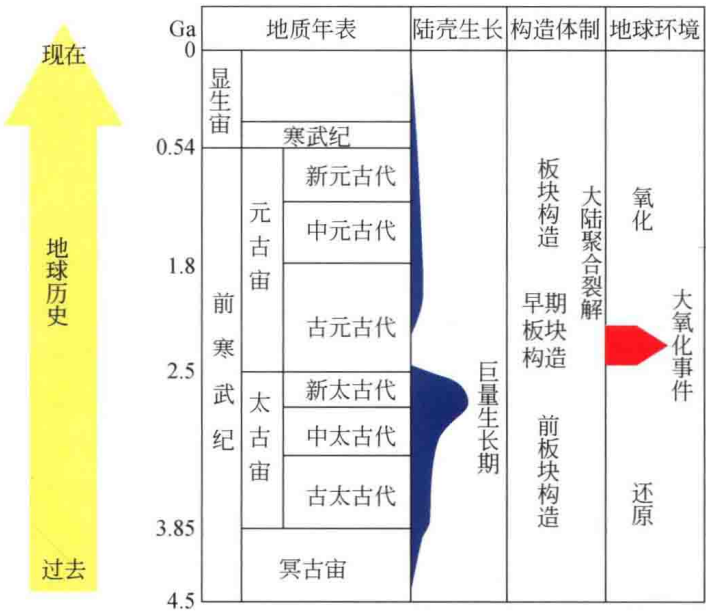


图 1.1 前寒武纪地质简表与重大地质事件示意图

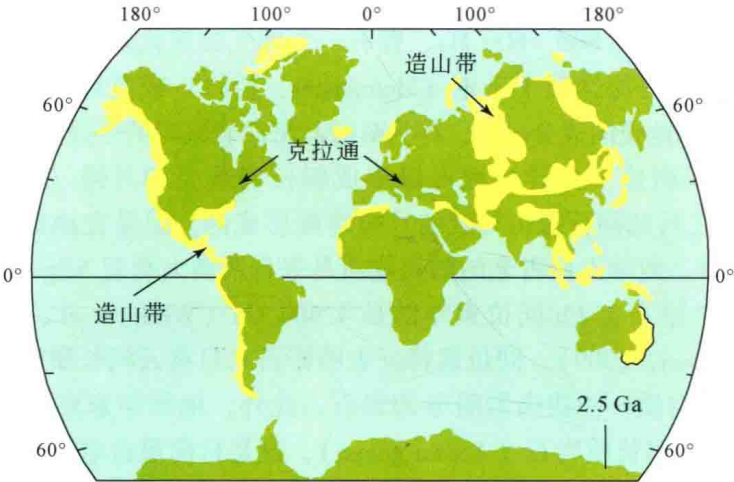


图 1.2 克拉通与造山带分布图

从大陆的形成、生长和稳定化过程可以看出地球的壳幔圈层和洋壳-陆壳的早期演变过程。太古宙克拉通的基本构造是绿岩带-高级区。太古宙绿岩带常见的火山岩组合是超镁铁质的科马提岩、基性的玄武岩和酸性的英安岩和流纹岩构成的双峰式火山岩组合，而现代岩浆弧的特征火山岩组合-安山岩以及洋壳特征的玄武岩-深海沉积岩在太古宙绿岩带火山岩组合中所占比例却很少或无法确定，这是板块构造理论在解释太古宙地壳形成方面所面临的一个挑战。此外，现代板块构造也不能圆满地解释太古宙绿岩带中科马提岩的成因。科马提岩特征与现代大洋岛弧玄武岩（OIB）相比有较高的 MgO 含量（>18%），要求其地幔熔融程度达到 40%~60%，形成温度在 1600℃ 之上。这样高的形成温度在俯冲带环境很难达到。穹窿状的麻粒岩-片麻岩地体（高级区）被向斜状低级变质-未变质的绿岩带围绕。这与显生宙造山带-克拉通的构造格局完全不同。太古宙麻粒岩的变质压力大多在中压变质的范围内（<10.0 GPa），温度大多在 800±50℃，位于夕线石稳定区。即使如此，太古宙麻粒岩形成的深度也在 25~30 km。太古宙高级区的岩石大致有三类，即 TTG 片麻岩、辉长岩及变质的表壳岩。表壳岩需要有从地表进入地壳深部的构造机制，但是作为可能是造山带的绿岩带的变质很浅，说明岩石没有进入深部地壳。因此，穹窿状的面状分布的太古宙麻粒岩地体俯冲的模式很难建立。已有重力反转、地幔柱加逆掩断层等多种假说。麻粒岩地体的成因与 TTG 的形成并称为陆壳早期演化的两大疑案。中国科学家率先发现的华北克拉通存在的高

温高压 (HT-HP) 麻粒岩和高温超高温 (HT-UHT) 麻粒岩, 近年来备受人们的关注, 并被视为探讨早前寒武纪大陆演化和早期板块构造的钥匙 (翟明国等, 1992; Carswell and O'Brien, 1993; Zhao et al., 1998; 郭敬辉等, 1999; Kröner et al., 2000; 魏春景等, 2001; O'Brien and Rötzler, 2003)。它们的变质大致可以分为峰期和中压麻粒岩 (角闪岩) 退变质期, 变质时代为 1.98 ~ 1.92 Ga 和 1.87 ~ 1.84 Ga。HT-HP 麻粒岩主要是含石榴子石的基性麻粒岩, 它们以透镜体或强烈变形的岩墙状出露于片麻岩中。HT-UHT 麻粒岩主要是富铝的变质沉积岩系, 俗称孔兹岩系, 其中有含假蓝宝石和尖晶石等矿物组合, 指示部分岩石的变质温度为 900 ~ 1000 °C。新的研究表明: ①两类麻粒岩在变质峰期温度和压力上有很大的重叠区间, 都经历了一个近等温—略升温的降压变质; ②两类麻粒岩很有可能在峰期和随后的降压变质阶段是同时的或有关联的; ③HT-HP 麻粒岩和 HT-UHT 麻粒岩的分布特征是线状或面状分布仍有待进一步查明; ④高级变质的麻粒岩代表了华北克拉通的最下部地壳, 它们变质的温压体系、岩石的刚性程度、分布特征、岩石组合及抬升速率等与显生宙明显不同。即使是高压麻粒岩, 也属于中压变质相系。两种麻粒岩的地温梯度为 16 ~ 22 °C/km, 孔兹岩和假蓝宝石麻粒岩的地温梯度为 20 ~ 28 °C/km, 远高于显生宙造山带的 6 ~ 16 °C/km, 其抬升速率为 0.33 ~ 0.5 km/Ma 或 0.33 ~ 0.5 mm/a, 远低于喜马拉雅造山带的抬升速率 (0.03 ~ 3 cm/a) 和大别山含柯石英榴辉岩的抬升速率 (3 ~ 5 mm/a)。这些特征的构造意义还需进一步解读。但是它们已经与太古宙绿岩带—高级区有明显的不同, 可能代表了早期板块构造, 并显示当时的板块体积小、地温梯度高、刚性程度低、俯冲深度小。地球的构造机制可能经历了前板块构造、早期板块构造及现代板块构造机制的多次转折。现代板块构造的正式启动可能发生在新元古代的罗迪尼亚超大陆裂解 (南华裂谷) 之后。此前从约 1.8 Ga 至约 0.7 Ga, 地球处于一个长时期的稳定状态, 称为地球的中年期。其特征是有稳定的沉积盖层和脉动式的陆内地幔活动, 发育以斜长岩为代表的非造山岩浆活动, 缺失造山型岩石和矿床, 很少有被动大陆边缘。中年期是地壳与地幔的调整与磨合期, 最终导致下地壳与地幔的调整、耦合, 实现现代岩石圈结构的确立 (翟明国等, 2014; Cawood and Hawkesworth, 2014)。此后地球进入现代板块构造阶段 (Zhai et al., 2015)。

地球早期的表层系统是贫氧的, 大气圈与固体圈层的耦合可能与超级克拉通的形成同步。从全球构造来看, 2.5 ~ 2.35 Ga 是一个静寂期, 此后, 推测在构造上有全球的超级克拉通裂解。从 >2.2 Ga 的某个时候起, 发生了氧的急剧升高, 在 2.2 ~ 1.9 Ga 时达到与现代相近的富氧状态。大气自由氧含量从 $<10^{-13}$ PAL 增至 15% PAL (PAL = present atmosphere level) (Karhu and Holland, 1996), 可见充氧量之大、速度之快是空前的。因此, Holland (2002) 使用大氧化事件 (great oxidation event, GOE) 的概念强调这次事件的重要性, 即 2.3 Ga 左右大气成分由缺氧变为富氧。水—气系统充氧事件及相关变化表现出短时性、剧烈性和系统性。各大陆出现红层、蒸发岩 (石膏、硼酸盐等)、磷块岩和冰碛岩, 特别是大量发育苏必利尔型条带状含铁建造 (BIF) (Huston and Logan, 2004), 以及含叠层石的厚层碳酸盐和菱镁矿 (Melezhik et al., 1999a, 1999b; Tang et al., 2013)。有机碳大量堆埋并形成石墨矿床 (陈衍景等, 2000)。沉积物出现 Eu 亏损, 并形成稀土铁建造, 碳酸盐碳同位素普遍正向漂移, 以及 S、N、Mo 等同位素显著分馏 (Schidlowski, 1988)。毫无疑问, GOE 是地球演化历史上最重大的地质事件之一, 它是地球环境巨变的里程碑。关于 GOE 起因, 有超级地幔柱活动或超级大陆裂解与陨石撞击等认识。大氧化事件在地球上有许多表现, 主要包括: ①全球性的水体和大气的氧逸度增高; ②导致水圈中离子的价态、种类和活度的变化, 也势必引起沉积物类型与性质的变化, 如海水中二价铁离子的价态改变, 形成大量的 BIF 沉积, 以及沉积物中稀土元素 (REE) 形式的改变等; ③氧逸度的改变导致温度的改变; ④促进生命的形成演化和生物圈的变化等。此外, 还有一些问题需要继续研究, 如: ①同位素示踪方法的研究和解析, 特别是 C、S、N、Mo、Cr 和 Fe 等 (Anbar et al., 2007); ②各种环境变化指标所揭示的不同现象出现的顺序、条件及其内在联系或因果关系; ③生命爆发与 GOE 之间的因果关系; ④成矿大爆发与 GOE 之间的内在联系, 特别是元素在 GOE 期间及其前后的地球化学行为和源运储条件的变化; ⑤后期构造热事件中 GOE 现象的变化程度、受变质地层的地质地球化学特征对 GOE 的记忆能力等。总之, GOE 是最近 30 年地球科学研究的重大进展, 也是未来研究的重要方向。

第二节 华北的陆壳演化与重大地质事件

华北是世界著名的克拉通之一，它与大多数克拉通有相似的演化历史，但同时又具有某些特点，如较好地记录了多期陆壳生长与活化、较强地记录了新太古代末（约 2.5 Ga）陆壳生长事件和 1.9 ~ 1.8 Ga 的造山和高级变质事件，以及中元古代的多期裂谷与岩浆事件等（图 1.3）。

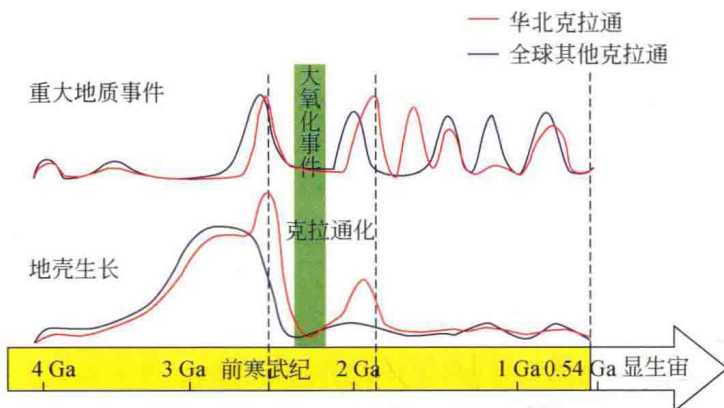


图 1.3 华北与全球的重大地质事件对比

华北有若干古老的陆核，它们以花岗质片麻岩和变质沉积砂岩中 3.8 ~ 3.0 Ga 的古老锆石作为指示标志。最近，华北中部、南部和西部的元古宙变质沉积岩和显生宙沉积岩中不断有 3.8 ~ 3.7 Ga 的碎屑锆石被报道。因此，推测冥古宙晚期—太古宙早期的古老陆壳岩石在华北可能比原来想象的分布更广。在华北南缘的古生代火山碎屑岩中还发现有约 4.1 Ga 的锆石，带有约 3.9 Ga 的变质环带，是目前在中国发现的最古老的锆石之一（第五春荣等，2010）。根据已有的地质资料，华北克拉通陆壳的 80% ~ 90% 是在早前寒武纪形成的，绝大多数形成于中—新太古代（Zhai and Santosh, 2011）。具有 3.0 ~ 2.5 Ga Sm-Nd 模式年龄的陆壳岩石约占 78%，其中 >3.0 Ga 的约占 15%，<2.5 Ga 的约占 7%，巨量陆壳（~55%）的形成应在 2.9 ~ 2.7 Ga。Hf 同位素模式年龄最主要的分布区间在 3.0 ~ 2.6 Ga，并且有 2.8 Ga 的峰值，与 Nd 同位素的地质意义相似（Wu et al., 2008）。通过长英质片麻岩和火山岩的研究，全球陆壳的巨量增生在 2.8 ~ 2.7 Ga，主要的岩石类型是高钠的长英质片麻岩（TTG），其次是镁铁质—超镁铁质火山岩。此次陆壳增生被推测与超级地幔柱事件有关。华北陆壳的增生与全球一致。太古宙的陆壳增生一般认为是围绕着古老陆核形成微陆块。华北的太古宙微陆块根据不同研究者的划分有 5 ~ 10 个，比较明确的 7 个太古宙微陆块是胶辽（JL）、许昌（XCH）、迁怀（QH）、鄂尔多斯（ER）、徐淮（XH）、集宁（JN）和阿拉善（ALS）微陆块。华北克拉通新太古代末（2.55 ~ 2.5 Ga）有很强的岩浆活动与地壳的活化。因此，强烈的陆壳增生在新太古代末完成，即完成克拉通化（翟明国，2011）。华北克拉通化标志着现代规模的华北克拉通已基本形成。主要的克拉通化标志是大量陆壳重熔花岗岩形成，侵入绿岩带和高级区，焊接了不同的微陆块及岩石构造单元，并且同期发生了广泛的变质作用；2.504 ~ 2.501 Ga 的未变质变形的超镁铁质—碱性岩墙侵入古老的变质岩中（Li et al., 2010）；浅变质的 2.510 ~ 2.504 Ga 裂谷型表壳岩作为盖层覆盖在古老的深变质基底之上（Lv et al., 2012）。

在古元古代末期—中元古代早期（1.95 ~ 1.80 Ga），华北克拉通内有三套古元古代火山沉积岩系，它们分别分布在吉林—辽宁—山东、山西—河南和晋冀北部—内蒙古中部。岩石总体都可分为含双峰式火山岩—沉积岩的下部岩系和变质泥质岩—蒸发岩（灰岩—白云岩）的上部岩系，火山岩的年龄在 2.20 ~ 1.95 Ga，并在 1.9 ~ 1.8 Ga 发生了不止一期的变质作用，变质程度可在绿片岩相—角闪岩相，局部与上述的 HT-UHT 岩石不好区分。火山沉积岩系呈线状的褶皱带，局部与基底似有不整合关系。变质作用有顺时针的 *P-T* 轨迹记录。翟明国（2004）、翟明国和彭澎（2007）等已将它们命名为胶辽活动带、晋豫活动带和丰镇活动带，其火山—沉积岩系分别是辽河群—粉子山群、溇沱群—中条群—吕梁群和二道洼群—上集宁群。古元古代

活动带有下面几个特点：具线性展布特征，有复杂褶皱形态；活动带岩石发生变质；有与其相应的花岗岩侵入，以及类似于裂谷-岛弧的成矿作用（Pb-Zn, Cu）。这些特点与现代裂谷-岛弧-碰撞带相似，而不同于太古宙的绿岩带-高级区的构造-变质格局。据此，翟明国（2011）、Zhai 和 Santosh（2011）等已经假设了华北克拉通初始的板块构造，即在太古宙克拉通化之后，又经过 2.5 ~ 2.35 Ga 的构造静寂期，华北克拉通发生了一次基底残留洋盆与陆内的拉伸-破裂事件，随后在 1.95 ~ 1.90 Ga，经历了一次挤压构造事件，导致裂陷盆地的闭合，形成晋豫、胶辽和丰镇三个活动带，它们在分布状态、变形与变质方面类似于现代陆陆碰撞型造山带（Zhai and Liu, 2003；翟明国，2011），造成克拉通中部迁怀陆块，以及北部集宁陆块和东部胶辽陆块等在碰撞及碰撞后基底掀翻，使下地壳岩石抬升。出露地表的下地壳以高级变质杂岩为代表（翟明国，2009）。与活动带相关的变质岩以高压基性麻粒岩和变质泥质岩为代表，基性麻粒岩以透镜体或强烈变形的岩墙状出露于片麻岩中。在紫苏辉石消失全部变为石榴子石-单斜辉石-石英-斜长石组合时，压力比二辉石共存时的更大，局部变为麻粒岩-榴辉岩转换相。孔兹岩是高温（HT）甚至超高温（UHT）富铝的变质沉积岩系，其中有含假蓝宝石和尖晶石等矿物组合，指示部分岩石的变质温度为 900 ~ 1000 °C。这期造山运动就是著名的溥沱运动或吕梁运动。之后，华北进入了地台型陆内演化阶段。

华北克拉通经历古元古代晚期的变质事件（吕梁运动或称中条运动）之后，开始进入地台演化阶段，即从此时起开始了裂谷系的发育与演化（翟明国等，2014；Zhai et al., 2015）。裂谷系可大致分为南、北两个在地表没有完全连接的裂陷槽和北缘、东缘各一个裂谷带。在华北的南部称为熊耳裂陷槽，熊耳群双峰式火山岩最古老的岩浆年龄为 1800 ~ 1780 Ma，向上的中-新元古代地层有汝阳群和洛峪群等。华南北部的裂陷槽称为燕辽裂陷槽，主要由长城系、蓟县系和青白口系组成。中-新元古代（1800 ~ 540 Ma）的岩浆作用可以分为 4 期：①火山岩分布在长城系的团山子组和大红峪组，锆石 U-Pb 年龄在 1680 ~ 1620 Ma，晚于熊耳群火山岩；②非造山侵入岩（斜长岩-奥长环斑花岗岩-斑状花岗岩）的同位素年龄在 1700 ~ 1670 Ma；③在原青白口系下马岭组的斑脱岩以及侵入下马岭组的基性岩席中，得到 1320 ~ 1300 Ma 的锆石和斜锆石 U-Pb 同位素年龄，在东缘裂谷的沉积岩中也有 1400 Ma 和 1300 ~ 1000 Ma 的碎屑锆石；④在华北及朝鲜的中-新元古代地层中，已经识别出约 900 Ma 的基性岩墙。此外，对华北北缘的白云鄂博群、狼山-渣尔泰群和化德群的研究，证实在华北北缘的裂谷系与燕辽裂陷槽具有相同的层序与沉积历史。其中在渣尔泰群中识别出约 820 Ma 的火山岩。值得注意的是，华北克拉通自古元古代末至新元古代，经历了多期裂谷事件，但是期间没有块体拼合构造事件的记录，没有造山带型矿床，反之大量发育与斜长岩-辉长岩有关的钛铁矿和与裂谷有关的 SEDX 型矿床。说明华北在这个地质时期处于“一拉到底”的多期裂谷过程，这对于理解华北中-新元古代演化历史以及该时期全球构造演化具有重要意义。

第三节 华北前寒武纪成矿

前寒武纪占地质历史的 85% 以上，形成了大陆地壳的主体，蕴藏着丰富的矿产资源（图 1.4），一些重要矿产，如铁、金、铜、铅、锌和铀等的资源量远大于其他地质时代。这些矿产的成因类型独特，与重大地质事件密切相关，具有鲜明的时控性，许多矿产类型仅限于特定地质时代，此后不再出现或极为罕见（Zhai and Santosh, 2013）。例如，BIF 只在早前寒武纪形成，它的形成与贫氧环境下氧化条件的快速升高以及由此引起的细菌活动有关，在中-新太古代和古元古代是居统治地位的矿种，在新元古代雪球事件中有少量重复，之后就再也没有出现过。

根据以上对华北克拉通的讨论，我们将华北克拉通的陆壳巨量增生、构造机制转折和地球环境剧变，以及古生代边缘造山事件和中生代岩石圈减薄再细化为 6 个比较重要的地质事件，它们是新太古代陆壳巨量生长和克拉通化事件、古元古代早期大氧化事件、古元古代裂谷-俯冲-碰撞事件（活动带）、古元古代末-新元古代持续多期裂谷事件、古生代边缘造山事件和中生代克拉通破坏事件。相对应于上述地质事

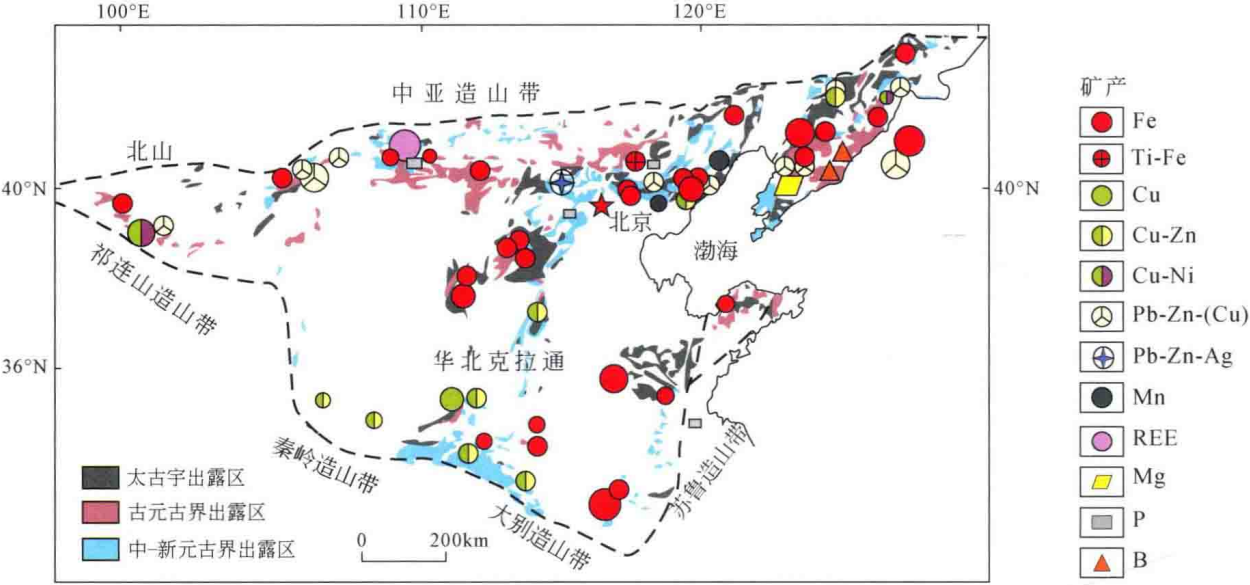


图 1.4 华北克拉通前寒武纪主要矿产分布简图

件，华北有 6 个重要的成矿系统，分别为太古宙 BIF 成矿系统、古元古代活动带型 Cu-Pb-Zn 成矿系统、古元古代大氧化条件下 Mg-B 成矿系统、中元古代 REE-Fe 和 SEDEX 型 Pb-Zn 系统、古生代造山带型 Cu-Mo 成矿系统、中生代陆内 Au 和 Ag-Pb-Zn 成矿系统、中生代陆内 Mo 成矿系统。

我们将前寒武纪重大地质事件与成矿作用概括如下：

(1) 前寒武纪最重要的地质事件有陆壳的巨量增生、前板块机制/板块机制的构造转折和由缺氧到富氧的地球环境剧变。

(2) 前寒武纪地质演化过程中形成了丰富的矿产资源，是地球最重要的成矿期之一。矿产资源的形成与地质事件有因果关系，即成矿背景受地质构造背景的控制。前寒武纪成矿具有时控性和不可重复性，随着地质时代的演化，矿种也从简单变得更丰富多样。

(3) 华北克拉通是全球最古老陆块之一，前寒武纪各阶段全球性重大地质事件几乎都被记录下来，并表现出一些特殊性。与全球其他克拉通相比，华北陆壳生长-稳定化过程具有多阶段特征，太古宙末—古元古代环境剧变记录复杂多样，古元古代与板块机制建立和超大陆演化相关的俯冲碰撞和伸展裂解等地质记录丰富，中-新元古代经历持续伸展并接受巨量裂谷沉积。

(4) 华北克拉通重大地质事件都伴随大规模成矿作用，形成了华北克拉通丰富的矿产资源和独特的优势矿种。

(5) 华北除了前面所述的“暴富”矿产外，也存在一些“暴贫”的矿产，即在许多克拉通发育而在华北不发育的矿产，如绿岩带型金矿和元古宙砾岩型铂金矿等，推测它们是在华北古元古代强烈陆壳再造事件以及华北中生代岩石圈减薄等后期构造事件中被改造（翟明国，2010）。因为铀、金等成矿温度都较低并且成矿元素易于迁移。而华北克拉通在古元古代末—新元古代的多期裂谷事件以及壳幔的相互作用，很可能是白云鄂博特大型稀土矿床的背景条件。在大氧化事件期间，推测华北处于浅海相—潟湖相，导致苏必利尔型 BIF 不发育，而异常地产出巨量的菱镁矿和石墨矿等（Zhai and Santosh, 2013）。

参考文献

陈衍景，刘丛强，陈华勇，张增杰，李超. 2000. 中国北方石墨矿床及赋矿孔达岩系碳同位素特征及有关问题讨论. 岩石学报, 16 (2): 233 ~ 244

第五春荣，孙勇，董增产，王洪亮，陈丹玲，陈亮，张红. 2010. 北秦岭西段冥古宙锆石（4.1 ~ 3.9Ga）年代学新进展. 岩石学报, 26 (4): 1171 ~ 1174

郭敬辉，翟明国，李永刚，李江海. 1999. 恒山西段石榴子石角闪岩和麻粒岩的变质作用、PT 轨迹及构造意义. 地质科学,

- 34 (3): 311 ~ 325
- 魏春景, 张翠光, 张阿利, 伍天洪, 李江海. 2001. 辽西建平杂岩高压麻粒岩相变质作用的 P - T 条件及其地质意义. 岩石学报, 17 (2): 269 ~ 282
- 翟明国. 2004. 华北克拉通 2.1 ~ 1.7 Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨. 岩石学报, 20 (6): 42 ~ 53
- 翟明国. 2009. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩 (HT-HP and HT-UHT) 及其相关问题. 岩石学报, 25 (8): 1553 ~ 1571
- 翟明国. 2010. 华北克拉通构造演化与成矿作用. 矿产地质, 39 (1): 24 ~ 36
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成. 中国科学 (D 辑), 41 (8): 1037 ~ 1046
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23 (11): 2665 ~ 2682
- 翟明国, 郭敬辉, 闫月华, 李永刚, 张毅刚. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. 中国科学 (B 辑), 22 (12): 1325 ~ 1330
- 翟明国, 胡波, 彭澎, 赵太平. 2014. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件. 地学前缘, 21 (1): 100 ~ 119
- Anbar A D, Duan Y, Lyons T W, Arnold G L, Kendall B, Creaser R A, Kaufman A J, Gordon G W, Scott C, Garvin J, Buick R. 2007. A whiff of oxygen before the great oxidation event? *Science*, 317 (5846): 1903 ~ 1906
- Binder A B. 1998. Lunar Prospector: overview. *Science*, 281 (5382): 1475 ~ 1476
- Bowring S A, Williams I S. 1999. Priscoan (4.00–4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134 (1): 3 ~ 16
- Carswell D A, O'Brien P J. 1993. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: examples from the moldanubian zone of the Bohemian Massif in Lower Austria. *Journal of Petrology*, 34 (3): 427 ~ 459
- Cawood P A, Hawkesworth C J. 2014. Earth's middle age. *Geology*, 42 (6): 503 ~ 506
- Harrison T M. 2009. The Hadean crust: evidence from >4 Ga zircons. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 37 (1): 479 ~ 505
- Hawke B R, Peterson C A, Blewett D T, Bussey D B J, Lucey P G, Taylor G J, Spudis P D. 2003. Distribution and modes of occurrence of lunar anorthosite. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 108 (E6): 4-1 ~ 4-16
- Hofmeister A M. 1983. Effect of a Hadean terrestrial magma ocean on crust and mantle evolution. *Journal of Geophysics Research*, 88: 4963 ~ 4983
- Holland H D. 2002. Volcanic gases, black smokers, and the great oxidation event. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66 (21): 3811 ~ 3826
- Huston D L, Logan G A. 2004. Barite, BIFs and Bugs: evidence for the evolution of the Earth's early atmosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 220 (1-2): 41 ~ 55
- Iizuka T, Horie K, Komiya T, Maruyama S, Hirata T, Hidaka H, Windley B F. 2006. 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust. *Geology*, 34 (4): 245 ~ 248
- Karhu J A, Holland H D. 1996. Carbon isotopes and the rise of atmospheric oxygen. *Geology*, 24 (10): 867 ~ 870
- Kröner A, O'Brien P J, Li J H, Passchier C W, Wilde S. 2000. Chronology, metamorphism and deformation in the lower crustal Hengshan complex and significance for the evolution of the North China craton, Abstract Volume CD. 31st International Geological-Congress, Rio de Janeiro, Brazil
- Li T S, Zhai M G, Peng P, Chen L, Guo J H. 2010. Ca. 2.5 billion year old coeval ultramafic-mafic and syenitic dykes in Eastern Hebei: Implications for cratonization of the North China Craton. *Precambrian Research*, 180 (3-4): 143 ~ 155
- Lv B, Zhai M G, Li T S, Peng P. 2012. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Qinglong volcano-sedimentary rock series in Eastern Hebei: Implication for similar to 2500 Ma intra-continental rifting in the North China Craton. *Precambrian Research*, 208: 145 ~ 160
- Melezhik V A, Fallick A E, Filippov M M, Larsen O. 1999a. Karelian shungite-an indication of 2.0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry. *Earth-Science Reviews*, 47 (1-2): 1 ~ 40
- Melezhik V A, Fallick A E, Medvedev P V, Makarikhin V V. 1999b. Extreme $^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ enrichment in ca. 2.0 Ga magnesite-stromatolites-dolomite- "red beds" association in a global context: a case for the worldwide signal enhanced by a local environment. *Earth-Science Reviews*, 48 (1-2): 71 ~ 120
- Nemchin A A, Pidgeon R T, Whitehouse M J. 2006. Re-evaluation of the origin and evolution of >4.2 Ga zircons from the Jack Hills metasedimentary rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 244 (1-2): 218 ~ 233
- O'Brien P J, Rötzler J R. 2003. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics.